

## 技術論文

# パワーステアリングシステムのためのCAE技術 CAE Technologies for Power Steering System

西村 慎二<sup>\*</sup> 鵜飼 文郎<sup>\*</sup>  
Shinji Nishimura Fumio Ukai

## 要 旨

当社では開発期間短縮を目的として、CAEを活用した製品開発に取り組んでいる。パワーステアリングシステムの開発では、システムを構成する各単体部品に対する各種FEM解析と、機構・制御系を含めたシステム全体を動的モデル化したシミュレーションによる音・振動問題などの検証及び最適化を図っている。本稿は、パワーステアリングシステム開発におけるCAE活用事例を基に、上記シミュレーションを含めた当社独自の解析技術を紹介する。

## ABSTRACT

CAE have been utilized to develop products in order to shorten the developing time-scale in our company. In developing the power steering system, FEM analysis has been practical used for various components.

And then, the dynamic simulation consists of mechanical and control model has been applied for vibration and noise analysis, and optimizing construction. This paper describes the unique technologies that are based on the various examples of CAE-utilize in developing a power steering system.

## キーワード

CAE, FEM, 3D-CAD, シミュレーション, パワーステアリング

## 1. はじめに

製品開発における開発期間短縮と開発コスト低減を図る上で、試作レス（設計→試作品製作→実験検証の繰返しをなくすこと）が究極のテーマとして挙げられる。一般に試作レスは、CAE（Computer Aided Engineering：コンピュータを用いた、製品モデルに対する数値解析やシミュレーションによる、製品性能・品質の予測）により実現可能と考えられている。

製品開発工程におけるCAEの効果を図1に示す。試作品の存在しない構想・設計段階からCAEを活用し、仮想試作品（例えば3D-CADモデル）に対する性能確認と最適化を図ることで、試作品数を低減できる。その結果として、全体的な開発

期間の短縮が期待できる。

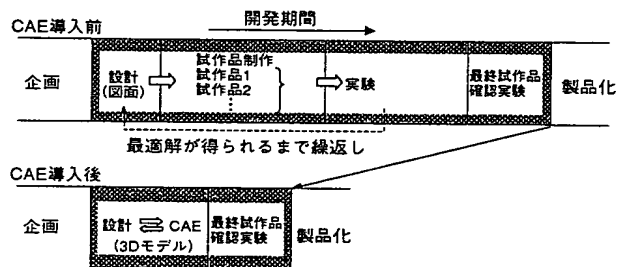


図1 CAE導入による試作レスの概念

今日、設計段階におけるCAEは、3D-CADの普及とともに、製造業として当然のこととなっており、CAEに対する課題は次の2点に移っている。

### ①CAEの効率化

短期間で成果を挙げるために、いかにCAEを使いこなして、精度の高い解析結果を効率的

に導き出すか。

## ②高度な解析技術の確立

製品の多様化・複雑化に伴い、高度な技術を必要とする解析（例えば衝突・変形などに用いられる非線形解析、熱応力などの連成解析、さらには音・振動問題に対するシステム全体の動的挙動解析）を的確に行えるか。

上記課題に対して、当社では、パワーステアリングシステム（以下PSまたはPSシステムとする）の開発において以下のように取り組んでいる。

①に対しては、CAE環境の整備、設計者に対するCAE教育の充実を図り、設計者自身が設計しながら解析を行えるようにした。これにより専任の解析担当者に頼ることなく、製品を熟知した設計者自身の手で解析が行えるようになり、要求に見合った解析結果を短期間で得ることができるようになった。

②に対しては、専任の解析担当者が積極的に高度な課題に取り組んでおり、解析技術の蓄積を図っている。表1に、これまでに取り組んできたCAE解析技術（FEM解析及びシミュレーション解析）を示す。

表1 CAE一覧

FEM	強度、熱、衝突、磁場、流体連成（熱応力など）
シミュレーション	PSポンプ流量特性、バルブ特性 配管脈動、油圧PSシステム動解析、...

本稿では、FEM解析において高度な技術を要した解析事例及び油圧PSシステムにおける動的問題に対するシミュレーション解析事例を紹介する形で、その技術的課題と、課題を克服する方策として用いたCAE技術について述べる。

## 2. FEM解析

FEM解析において、現在までにPSを構成する各部品単体に対して様々な解析を行い、実績を積み重ねている。特に油圧PSに対するFEM解析技術は完成域に達しつつあり、電気PSに対するFEM解析技術の確立にも積極的に取り組んでいる。

解析の種類としては材料非線形、接触、大変形、熱、磁場、流体及び連成などの解析を行っており、今までのPS部品の解析実績を解析種類毎にまとめた解析MAPを作成している（表2）。

表2 PS部品におけるFEM解析MAP

	強度	熱	振動	非線形	磁場	流れ	連成
PSポンプ	●	●	●	●	○	○	●
PSギヤ	●	●	●	●	○	○	○
配管	●	○	●	●	○	○	○
リザーバ	●	●	●	●	○	○	○
電気PS	●	●	●	○	○	○	○

なお、解析担当者は設計者と同じ3D-CADソフトをプリソフトとして使用している。これにより設計者が作成したモデルをスムーズに非線形解析へ移行でき、設計者と解析担当者の密な連携の下で最適設計に挑んでいる。

以下に事例を基に、当社で行った高度なFEM解析技術を紹介する。

### 2.1 複合材（樹脂×鉄）の熱応力連成解析

樹脂と鉄がセレーションで接合されている部分において、温度変化により異種材料の線膨張係数の違いから接合部に応力が発生する。その応力による破損を防止するために、温度依存形の熱応力連成接触解析を行い、応力値を推定した。

モデルの構成を図2に示す。過渡熱解析時の接

触伝熱要素と応力解析時の接触要素を両方作成し、接合部は要素を特に細かくした。

解析結果を図3に示す。解析結果から、高温時に応力が高くなる形状及び低温時に応力が高くなる形状の特徴を把握することができた。

この解析結果を基に接合部を修正し、高温低温の両方のヒートショックに対して有効な最適形状を導出した。

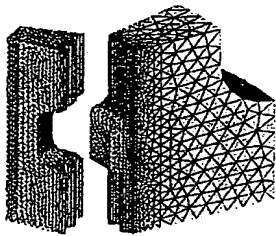


図2 熱応力解析モデル



図3 熱応力解析結果

## 2.2 ピストンカシメの大変形解析

ピストンカシメの解析は大変形解析となる。そのため、メッシュがいびつな形状になった場合に、メッシュを自動的に切り直す自動リゾーニング(以後、リメッシュ)という機能を使用している。このような解析は、リメッシュのタイミングにより解析精度が大きく左右される。

そこで、カシメ量(治具の移動量)、メッシュの歪上限値、メッシュサイズを適切に設定し、リメッシュ時に発生する誤差を最小限に抑えた。

解析結果として図4にカシメの進行図を示す。この結果より、カシメによる変形状の推移が把握できた。

さらに、カシメ荷重とストロークの関係をグラ

フ化した図5において、解析結果は実測値の特徴を表している。特に、カシメ前半の荷重のコブや、中盤以降の荷重の落込みを再現できており、カシメ具合に対応する荷重推移の意味するところが理解できた。

PS部品におけるピストン以外のカシメ部に対しても、同様のカシメ解析による形状予測を展開している。

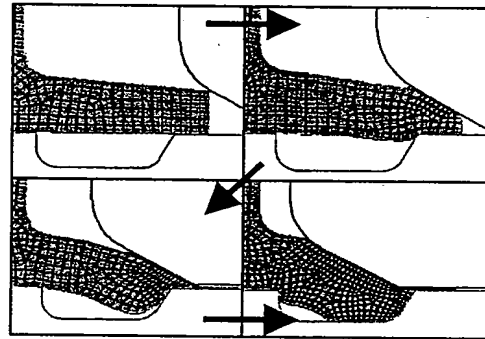


図4 カシメ進行図

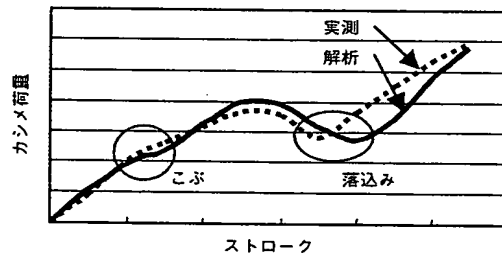


図5 ストロークに対するカシメ荷重

## 2.3 ポンプ内流れ解析

所望のポンプ特性を求めるため、CFD(Computational Fluid Dynamics)による流れ解析を行った。基本的には式(1)式(2)で定義されるNavier-Stokes方程式<sup>1)</sup>を差分法で解き、高レイノルズ時には最適な乱流モデルを導入している。

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + \frac{\nu}{3} \nabla \Theta + F \quad (1)$$

$$\Theta = \nabla \cdot v \quad (2)$$

$\rho$ : 密度  $P$ : 圧力  $\nu$ : 動粘度

$v$ : 速度  $F$ : 外力

図6にポンプ内流れの解析モデルを示す。管路形状の極端な変化により複雑な流れ場になる部分や壁境界部には、解析結果から判断した最適なメッシュを配置し、非線形計算における不安定性を克服している。そして、精度の高い計算を短時間で行えるよう、メッシュを適正化している。

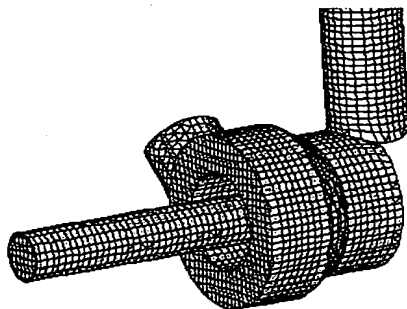


図6 ポンプ内流れ解析モデル

図7に流れ解析結果としての流線を示す。この結果及びポンプ内部の圧力分布や流速などから、ポンプ内の流れ場が把握できた。

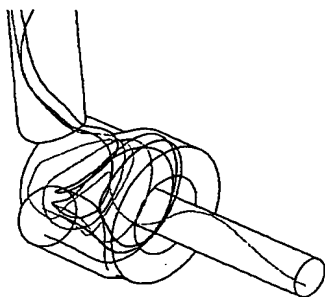


図7 流れ解析結果（流線）

これらの結果を基に、どのような流れ場がポンプ特性改善につながるかを検討した上で、これを実現するポンプ内最適形状を導出した。

また、異音やエロージョンの原因となる気泡の発生を考慮したキャビテーションモデル、さらに、CFD解析手法として知られる非線形K-εモデルやLES (Large Eddy Simulation) モデルなどの乱流モデルを導入し、解析精度の向上を図っている。

## 2.4 3Dかみあい解析

ウォームギヤのかみあいのような大きな滑りを伴う解析は、曲面を平面近似するFEM解析では接触位置が不安定となるため収束しにくい。さらに、樹脂材のため負荷による弾性変形を伴いながら接触するという難しい解析になる。

これらの課題を考慮して、3次元歯車かみあい理論<sup>2)</sup>を適用した。図8に示す空間上での歯面のかみあいにおいて、式(3)のかみあい方程式から負荷変形、製造誤差、熱膨張などを考慮したウォームギヤの歯面を導出した。これを基に平面近似による微小隙間を修正したメッシュを作成した。

$$(\omega_I \times \gamma_I - \omega_{II} \times \gamma_{II} + v_I - v_{II}) \cdot n = 0 \quad (3)$$

- $\omega_I$  : 歯車Ⅰの回転角速度ベクトル
- $\gamma_I$  : 歯車Ⅰの歯面ベクトル
- $v_I$  : 歯車Ⅰ軸方向移動速度ベクトル
- $\omega_{II}$  : 歯車Ⅱの回転角速度ベクトル
- $\gamma_{II}$  : 歯車Ⅱの歯面ベクトル
- $v_{II}$  : 歯車Ⅱ軸方向移動速度ベクトル
- $n$  : 歯面上のかみあい点における法線ベクトル

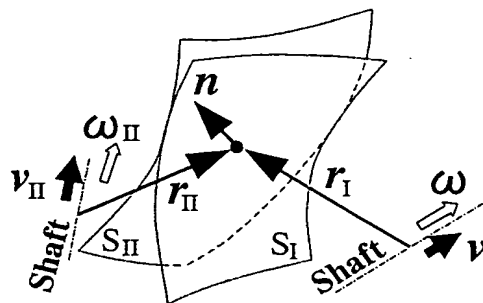
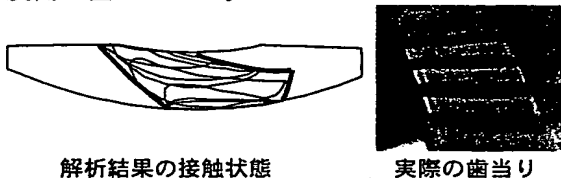


図8 空間上の歯面のかみあい

このモデル化により、大きな滑りを伴う解析においても安定した解が得られ、図9に示すように、実測と一致するかみあい結果を求めることができ

た。

本解析を基に歯面設計ツールを構築し、複数歯のかみあいにおける荷重バランスの解析などへの展開を図っている。



解析結果の接触状態

実際の歯当り

図9 かみあい解析結果

### 3. シミュレーション解析

当社では、油圧PSシステムの設計・試作評価の場面において有効的に活用できる解析ツールとして、PSシステムを構成する各単体部品に対して、要求された性能・特性を満足する諸元を机上検討する部品性能設計検討ツール（ポンプ流量シミュレーション、バルブ特性シミュレーションなど）を開発し活用している。また、音・振動問題の事前予測・最適化を目的として、PS用供給管路の脈動伝達特性を計算する配管脈動シミュレーション及び過渡応答などの動的挙動を予測する油圧PS動特性解析シミュレーションを開発した。ここでは、配管脈動シミュレーション及び油圧PS動特性解析シミュレーションの概要を紹介する。

#### 3.1 配管脈動シミュレーション

油圧PSシステムにおいて、PSポンプの流量変動（ポンプ脈動）に起因する異音が問題となる場合がある。その対策としてPS供給管路の減衰効果を応用して、配管諸元のチューニングによるポンプ脈動の減衰を図るのが一般的である。通常設計段階において、ポンプ脈動に起因する異音を回避する最適配管条件を事前に導出する必要があり、これを机上で検討できるツールとして配管脈動シ

ミュレーションを用いている。

配管脈動シミュレーションは、PS供給管路の諸元（ラセン管種類、長さ、ホース特性など）を入力として、インピーダンス法を用いて任意の点間の脈動伝達特性（例えば配管入口圧力変動に対する配管出口圧力変動）を計算・グラフ化するツールである。

例として、図10に示す対策前後の供給管路に対する計算を行った。対策前後の違いはゴムホース内のラセン管有無のみで、各寸法などは同一である。

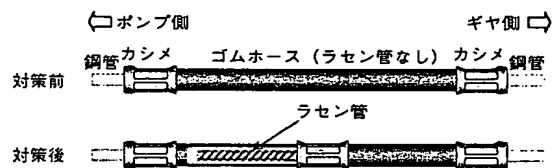


図10 対策前後の供給管路

その計算結果を図11に示す。対策前の供給管路において約270Hzの共振点が見られる。これに対して、対策後の供給管路では全体的にゲインが低減し、特に200～400Hzで大きく改善しており、ラセン管が脈動低減に効果のあることがわかる。

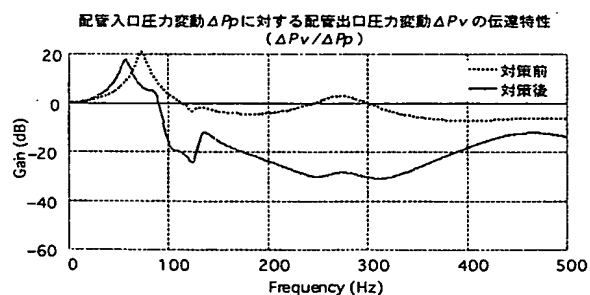


図11 配管脈動シミュレーション計算結果

#### 3.2 油圧PS動特性解析シミュレーション

PS搭載車では、ハンドル急操舵などの過渡的入力が入った場合に、音・振動などの異常現象が起りやすい。一般にこのような動的問題について解析を実験的に行うことは困難である場合が多

い。そこで、過渡的入力に対する動特性解析を机上で行うことを目的として、図12に示すように油圧PSシステム全体を油圧系—機械系の連成モデルと考え、さらに、管路内流れと管壁の膨張・収縮を考慮した油圧PS動特性解析シミュレーションを開発した。

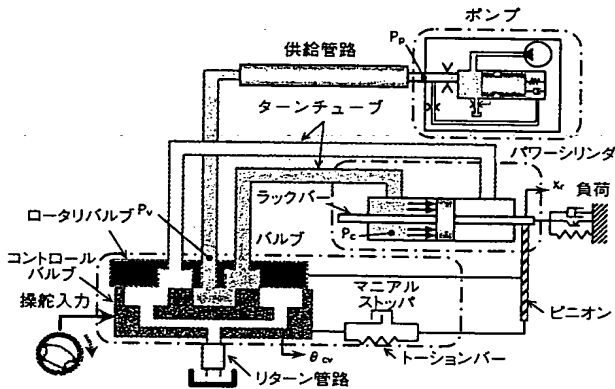


図12 油圧PSシステムの油圧系—機械系連成モデル

これまでに、ハンドル急操舵時の油圧系の応答遅れ<sup>4)</sup>や自励振動<sup>5)</sup>などの現象に対し、本シミュレーションによる動的解析を行い、それらの発生メカニズムを明らかにした。さらに各現象に対するPS構成部品の各種パラメータの影響度を定量化し、各現象を回避するための設計指針を導き出した。次節に解析事例として、油圧PSにおける自励振動に対する供給管路諸元の影響度について検討した結果を述べる。

### 3.3 [解析事例] 供給管路諸元による油圧PS系自励振動低減法の検討

油圧PSシステムの開発において、急操舵時に自励振動が発生する場合、実験にて試行錯誤で供給管路などの諸元を変更し、振動低減が図られてきた。その後作業効率化のため、机上にて油圧PS動特性解析シミュレーションを用いて最適値の導出を図ってきたが、自励振動を抑制するにはどうす

ればよいかの指針が明確化されておらず、結局試行錯誤的な解析を強いられていた。そこで、本シミュレーション上にて、供給管路諸元が振動に及ぼす影響について調査し、振動低減のための指針を導出した。

図13に調査対象の供給管路構成を示す。管路前後が鋼管で、間にゴムホースを配置した一般的な供給管路構成である。検討パラメータとして、供給管路全長を固定し、ゴムホース長 $L_h$ 及びゴムホース位置 $L_{tv}$ （供給管路下流端からゴムホース端点までの距離）を変化させて、自励振動にどのような影響を及ぼすかを調査した。

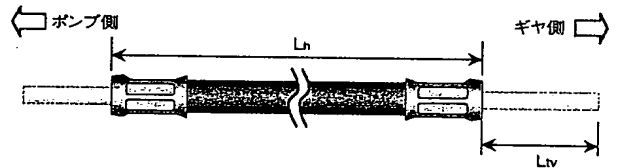


図13 供給管路構成

図14はその実験及び計算結果で、横軸に $L_{tv}$ 、縦軸に $L_h$ を示している。図14において自励振動が発生しにくい領域があることがわかる。この結果を詳細に解析すると以下のことが言える。

- ・ ホース長が短いとホース位置にかかわらず自励振動は発生する。よって、ホース長はある程度の長さを確保する必要がある。
- ・ ホース位置として、ホースが下流側から遠ざかるほど自励振動は発生しやすくなる。よって、ホースはできる限り下流側に配置した方がよい。

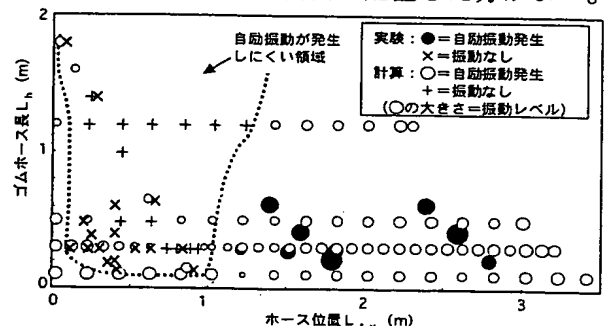


図14 自励振動へのゴムホース長・位置の影響

局試  
本シ  
に及  
指針

路前  
的な  
、供  
ゴム  
ース  
どの

□

→

、tv、  
振動  
の結

自動  
程度

ざか  
、ホ  
い。

□

□

#### 4. おわりに

当社におけるPSシステムの開発では、CAEによる解析件数が年々増加している。これに伴い試作品数が減少し、図15に示すように試作費が低減でき、着実にCAE活用の効果は上がっている。

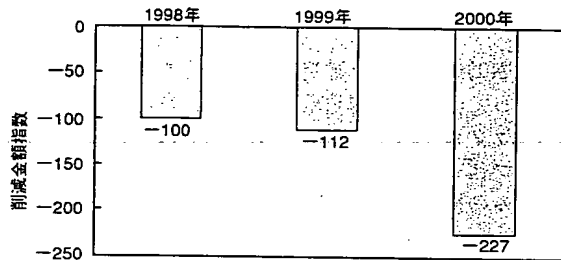


図15 試作費削減金額指数 (1998年を-100とした場合)

しかし、試作レスという面から見るとまだ不十分で、更なる製品開発の効率化に取り組む必要がある。試作レスに向けて重要となるのが、迅速な対応、多様な課題への対応及びCAE解析結果の信頼性確保である。迅速な対応、多様な課題への対応に関しては、冒頭で述べたように設計者によるCAEの推進及び新解析技術の蓄積を積極的に図っている。解析結果の信頼性に関して現時点では、CAEで解析した結果が実際の物の特性を十分に表しているかどうかの判断を、試作品に対する実験結果との整合性に委ねる場合が多く、CAE解析結果だけで定量的判断を下す材料が不足しているのが実状である。

今後は、より高度なCAE解析技術・ノウハウの蓄積を図るとともに、試作品での検証実験に拠ることなくCAE解析結果の信頼性を確保できるよう、より多くの解析実績の蓄積を図り、開発期間短縮と開発コスト削減を現実のものとしていく所存である。

最後に、流れ解析、配管脈動解析及び油圧PS動特性解析を行うにあたり、ご指導、ご協力をいた

だいた豊田中央研究所関係者の皆様に深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 中林巧一 他2名：流体力学の基礎(1)，コロナ社，(1993)P116～P121
- 2) F.L.Litvin：Gear Geometry and Applied Theory，Prentice-Hall,Inc，1994
- 3) 竹内克之：パワーステアリングシステムの圧力脈動解析，豊田工機技報VOL.37 No.3(1997.3)P40～P44
- 4) Nishimura,et.al：Analysis of response lag in hydraulic power steering system，JSAE Review Vol.21 No.1 January 2000 P41～P46
- 5) Matsunaga,et.al：Analysis of Self-Excited Vibration in Power Steering System，Proc. Int. Symp. on AVEC'92，(1992) P516～521

#### ■著者紹介■



西村 慎二



鶴岡 文郎

## 編集後記

最近、子供の世界に留まらずハリーポッターが大人気で、書店や映画館をにぎわしている。近年の暗い話題が多い中、魔法という非現実に希望を求めているのかもしれない。ハリーポッターの物語にはさまざまな伏線が用意されており、それらがうまく関連し合い最後のどんでん返しにも不自然さが感じられないところも面白味を増している。

最終巻の結末はすでに出来あがっていると聞かすが、作者が有名になり環境が変わることによりJ.K.ROWLING氏の持ち味が変わることを危惧する。

同様に、技報も厳しい原稿納期フォローにより著者の伝えたい製品の良さが失われることの無いように心がけていきたい。(柴田)

今年は、4年に一度の冬季オリンピックの開催年に当たります。オリンピックはアスリートにとって、日頃の成果を発表する場です。技報もオリンピッ

クと同様、日頃の成果を発表する場です。

今回は、自動車部品特集号ということで、駆動、PS関連の記事が掲載されています。まさに自動車部品関連の成果発表の場となっています。

今後もこの技報が、自動車部品を始め豊工マンたちの成果発表の場で在り続けるよう、努力して行きます。(覚前)

昨年の10月より勤務地が変わり通勤・工場間移動に1時間ほどかかるようになり、車中でラジオ放送を聞く機会が増えた。その時に国会質問・答弁を聞いていると野党は与党に対して色々な方向から問題点を掘り起こし話を潰そうとしているとしか聞こえてこない。

企業内では、技術的な問題の掘り起こしとそれに対する対策まで会議の中で決めたいものである。問題の提示だけではできないのでは技術者としてはどうでしょうか。(林)

### 豊田工機技報 VOL.42 No.3 (通巻150号)

印刷 平成14年2月25日

発行 平成14年2月28日 ©豊田工機株式会社2002 (禁無断転載)

発行人 阿部 忠之

編集 豊田工機技報編集委員会

編集委員長 深見 肇

編集委員 酒谷 正憲 横澤 浩 山内 正 奥谷 昭也

林 哲也 覚前 敏男 稲田 豊 柴田 由之

相馬 隆次 三上 俊春 村上 剛 服部 康弘

西村 慎二 宇野 禎二

事務局 遠山 退三 石橋 仁也 石川 千枝

印刷人 鶴見 陽一

印刷所 株式会社 文方社

発行所 愛知県刈谷市朝日町1丁目1番地

豊田工機株式会社

電話 (0566) 25-5262